

# les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

216

Avril 2017

TOUT  
S'EXPLIQUE

Supplément détachable  
sur l'Univers  
en technicolor

02

## L'INTERVIEW

◆ Avec deux bourses ERC, le spécialiste de nanoélectronique Christian Glattli propose une nouvelle manière d'encoder l'information binaire ◆

04

## ACTUALITÉ

◆ Des lycéens du monde entier planchent sur le nucléaire ◆ Au top des classements ◆ De la data intelligence à Digitec, futur pôle des technologies numériques de Paris-Saclay ◆

06

## SUR LE VIF

◆ Voir à travers la lumière ◆ Sus au Chikungunya ! ◆ Adieu chauffages et climatiseurs ? ◆

09

## LE POINT SUR

◆ Les planètes de Trappist-1 ◆

20

## SCIENCES EN BREF

◆ Vers une nouvelle génération d'imageurs ◆ D'où viennent les fleurs ? ◆ Examens sans faille des clichés médicaux ◆ Le riz, espèce menacée ◆ Les bonbons ne sont pas si bons... ◆ Nanoparticules dispersées en ordre de marche ! ◆ Clock Mesh règle l'horloge interne des circuits ◆ Ballet de bactéries ◆

23

## KIOSQUE



12

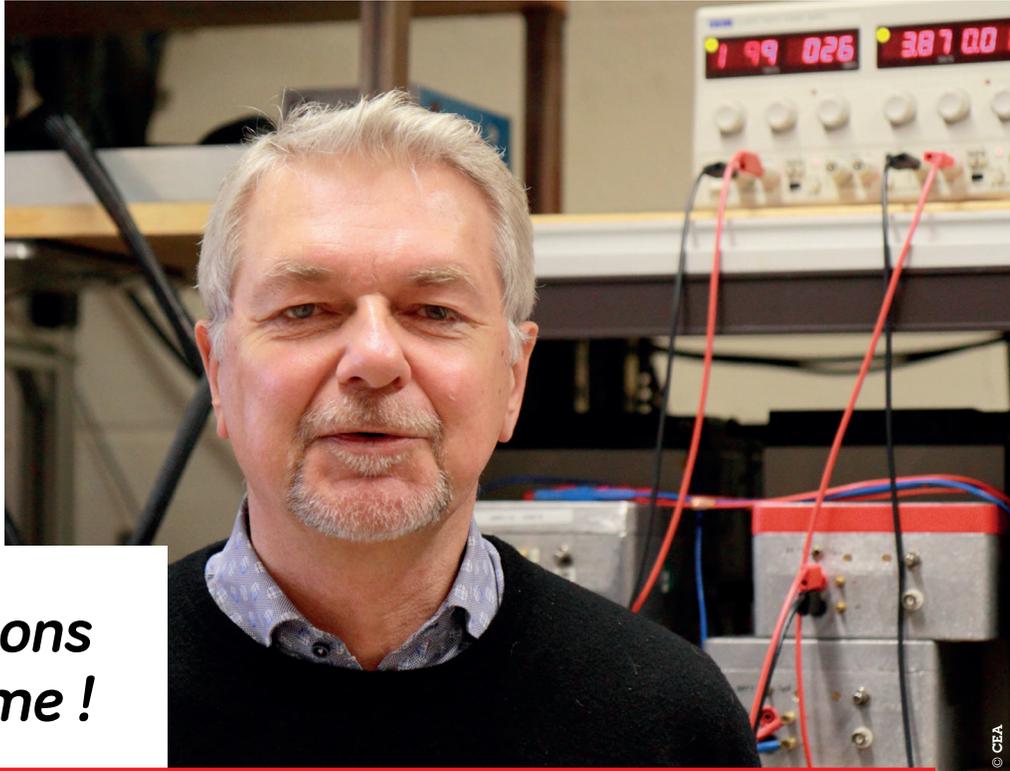
DOSSIER

Énergie nucléaire

# Incontournables simulations

**CHRISTIAN GLATTLI,**

physicien à l'institut Rayonnement matière de Saclay (Iramis) du CEA



## Tous les lévítions mènent à Rome !

Spécialiste de nanoélectronique quantique, lauréat ERC à deux reprises, il a découvert expérimentalement les lévítions. Christian Glattli propose aujourd'hui une nouvelle manière d'encoder l'information binaire, avec l'avantage d'une transmission économe en bande passante. Les secteurs des télécommunications et de l'Internet des objets pourraient avoir fort à gagner de pareilles avancées. Retour sur une aventure très fondamentale.

Propos recueillis par Aude Ganier

**L'étude très fondamentale du « bruit quantique dans les conducteurs quantiques » est votre domaine de prédilection. De quoi s'agit-il ?**

J'étudie les propriétés quantiques de nano-conducteurs (nanoélectronique) ; notamment pour mettre en évidence les effets de cohérence quantique<sup>1</sup> qui autorisent la superposition d'états quantiques dans ces conducteurs, c'est-à-dire qu'une particule peut se

trouver simultanément dans deux états (ou plus). Cette superposition d'états intéresse la communauté car elle permet un traitement quantique de l'information en codant les états superposés comme les 1 et les 0 du langage binaire. Ce type de recherche donne également une nouvelle grille de lecture pour explorer de nouvelles propriétés quantiques de la matière. Dans ce cadre, j'ai développé très tôt des mesures du « bruit quantique » qui se manifeste par des fluctuations dans la mesure d'un courant électrique. Il est difficile à mesurer car il est le plus souvent noyé dans le bruit parasite de l'instrumentation.

**Ce bruit quantique est au cœur de votre projet MeQuaNo<sup>2</sup>, objet d'une bourse ERC Advanced Grants en 2008. Vous l'aviez déjà étudié auparavant ; là, vous démontrez que sa mesure peut être un outil pour caractériser des électrons uniques...**

L'objectif du projet fut de développer une façon nouvelle, efficace et performante d'injecter, à la demande, des électrons uniques

dans un conducteur quantique, tout en utilisant le bruit quantique pour caractériser leurs propriétés. Il s'agit d'appliquer une impulsion de tension sur une durée suffisamment courte pour que le courant injecté se réduise à sa valeur minimale: l'injection d'un unique électron, porteur de la charge élémentaire. Si l'idée est simple, sa physique l'est beaucoup moins! Un conducteur étant déjà rempli d'électrons, l'impulsion de tension électrique perturbe l'ensemble du système, excitant de nombreux électrons. Et l'injection d'un électron unique est alors source de bruit. Avec mon équipe, nous avons montré que le bruit quantique permettait de mesurer le nombre total d'excitations produit par chaque impulsion, générant un bruit de l'ordre du femto-ampère par racine Hertz (pour des électrons injectés toutes les nanosecondes).

**Et vous êtes parvenu à une très grande découverte, expérimentale, celle du lévítion...**

Pour atteindre une injection d'électrons individuels idéale, c'est-à-dire qui ne créerait pas

Notes :  
1. Obtenue à basse température et sur une échelle sub-micronique, dite mésoscopique.  
2. Mesoscopic Quantum Noise.  
3 Classical Levitronics.

d'excitations supplémentaires, je me suis souvenu de travaux théoriques datant d'une vingtaine d'années. Leonid Levitov, physicien d'origine Russe, maintenant au MIT USA, avait suggéré qu'une impulsion électrique au profil temporel approprié pouvait n'exciter qu'un seul électron. Nous avons réussi à produire cette impulsion et avons obtenu une particule faite d'un électron unique se propageant de manière idéale, sans aucune perturbation des autres électrons dans notre conducteur quantique. Nous l'avons baptisée Léviton.

**Vos découvertes vous ont permis d'obtenir, en 2016, une ERC Proof of concept pour le projet C-Levitonics<sup>5</sup>. En quoi ont-elles un potentiel applicatif ?**

En essayant de comprendre la nature de l'état quantique du léviton, je me suis aperçu d'une propriété importante: l'impulsion de tension module la phase d'une onde électronique de manière particulièrement remarquable. J'ai alors réalisé qu'on pourrait utiliser le même principe pour moduler la phase d'une onde électromagnétique classique de la même manière. Dans les communications digitales, de nombreux protocoles de

codage des bits d'information sont utilisés en modulant la phase d'une onde porteuse. De ce fait, le spectre en fréquence associé à l'onde s'étale en dessous et au-dessus de la fréquence centrale: en gros, il y a deux bandes latérales transportant la même information. La suppression de l'une d'elles n'altérerait en rien le signal transmis et optimiserait l'occupation spectrale, augmentant le débit ou le nombre d'utilisateurs et ainsi diminuant les coûts... Le projet ERC C-Levitonics consiste à évaluer la modulation de phase de type « lévitonique » qui a la propriété remarquable de générer, directement à l'émission, un signal modulé avec une bande latérale unique. Dans les téléphones portables, il existe plusieurs types de modulation suivant la qualité de réception du signal; celle que je propose ne nécessiterait pas de changer de système mais seulement de logiciel. Avec Preden Roulleau, jeune physicien recruté lors de mon ERC (lui-même lauréat d'une ERC 2015), j'ai déposé un brevet et me suis associé à une équipe de Centrale-Supélec Rennes pour évaluer les performances de notre procédé. C-Levitonics découle d'un processus typique de « sérendipité », et montre une fois de plus l'intérêt de recherches

très fondamentales qui souvent aboutissent sur des propositions concrètes.

**Envisagez-vous de créer une start-up ?**

Je suis actuellement en phase d'évaluation de différents secteurs applicatifs, tandis que la mise en contact avec des industriels se fera grâce aux experts du Bureau d'études marketing et stratégiques du CEA. Je n'envisage pas la création d'une start-up mais plutôt un transfert technologique vers un industriel. Plusieurs domaines sont concernés dont les télécommunications. Et pourquoi pas aussi celui de la musique, des synthétiseurs. Par exemple, j'ai réussi à générer directement des accords majeurs ou de septième par modulation lévitonique de la seule note fondamentale. Grâce aux conseils de John Chowning de l'Université Stanford (USA), l'inventeur de la synthèse musicale par modulation de fréquence, je suis actuellement en relation avec Yamaha Music au Japon pour évaluer l'intérêt du procédé. La génération directe de signaux modulés à bande latérale unique pourrait avoir également des applications pour les radars et l'échographie-Doppler, afin de dépasser certaines limitations fondamentales dans la mesure des vitesses.

## Les bourses ERC

Les bourses très sélectives de l'European Research Council (ERC) sont attribuées individuellement à des chercheurs du meilleur niveau international dont les projets sont en rupture par rapport à l'état de l'art scientifique (voir *Défis du CEA n°215*). Elles comptent cinq catégories, parmi lesquelles :

### Advanced Grants:

jusqu'à 2,5 millions € sur 5 ans pour des chercheurs confirmés.

### Proof of concept (Poc):

150 000 € sur 18 mois réservés aux lauréats ERC pour réaliser la preuve de concept de leur projet.

**Que diriez-vous aux chercheurs tentés par l'aventure ERC ?**

L'important est de proposer un projet très novateur et de faire sentir dans l'écriture du dossier l'enthousiasme ou son caractère exaltant. Après, c'est la loterie: parmi les rapporteurs, il suffit que l'un ne soit pas convaincu pour être recalé. Mais il ne faut pas se décourager car l'ERC est une occasion unique pour développer des projets ambitieux, hors des sentiers battus. C'est un moment privilégié où pendant cinq ans nos rêves deviennent possibles. ♦

## Bio express

1986

Entrée au CEA après une thèse d'État sur les cristaux d'électrons

1996

Première publication sur la mesure du « bruit quantique »

1998

- Prix Louis Ancel de la Société Française de Physique  
- Médaille d'argent du CNRS  
- Prix AGILENT de la Société Européenne de Physique

2010

Lauréat d'une bourse ERC *Advanced Grants* pour son projet MeQuaNo

2015

Lauréat d'une bourse ERC PoC pour son projet C-Levitonics



European Research Council  
Established by the European Commission



Retrouvez les témoignages de lauréats ERC du CEA, sous la forme d'ITW filmées ou écrites, pour découvrir les enjeux et perspectives de leurs recherches.  
<http://cea.fr/go/portraits-erc>

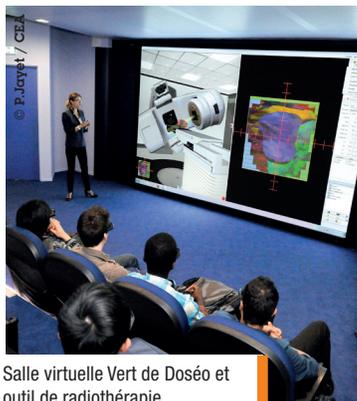
Ateliers à l'INSTN du CEA.



Rencontres internationales

## Des lycéens du monde entier planchent sur le nucléaire

150 lycéens et leurs professeurs venus des quatre coins du monde (Allemagne, Biélorussie, Colombie, France, Japon, Moldavie, Ukraine) ont présenté au CEA Paris-Saclay le résultat de leurs travaux sur la maîtrise des risques liés à la radioactivité. Et cela, dans le cadre des Rencontres internationales lycéennes de la radioprotection organisées depuis 2008 par différents organismes, dont le CEA. Lors de cette édition, et grâce au soutien de la Fondation franco-japonaise Sasakawa, une délégation de Fukushima a pu restituer son travail sur la question de l'évacuation des populations et de leur retour dans les territoires à Fukushima. Tout au long de l'année, les élèves de la seconde à la terminale s'impliquent, sur la base du volontariat, dans des activités en lien avec la radioprotection. Ils travaillent en ateliers sur différents thèmes et visitent des installations de recherche. Cette année, ils auront pu découvrir la plateforme Doseo, l'ancien réacteur de recherche EL3, la salle virtuelle Vert et le laboratoire de scintillation liquide du CEA.



Salle virtuelle Vert de Doseo et outil de radiothérapie.



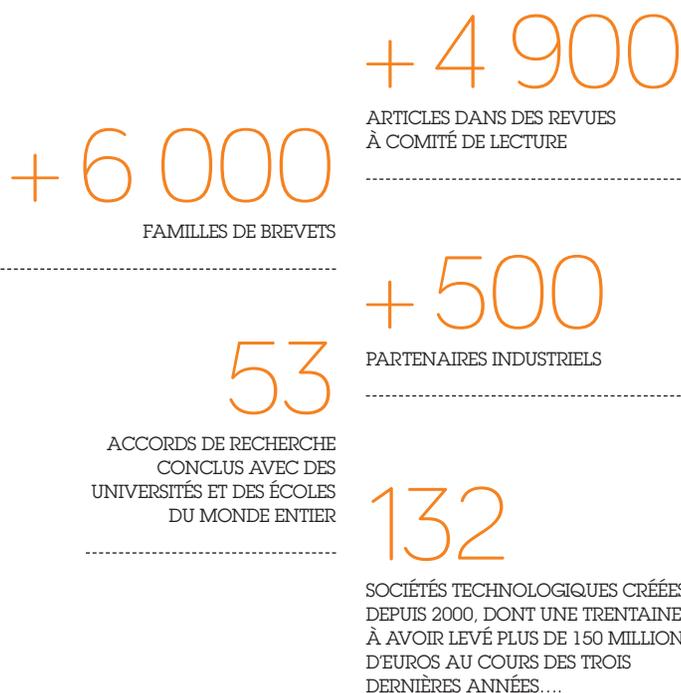
Innovation & propriété intellectuelle

## Au top des classements

27 mars 2017 : l'Institut national de la propriété intellectuelle (INPI) publie son traditionnel classement des déposants de brevets. Le CEA y conserve sa quatrième place, avec 684 demandes publiées en 2016, particulièrement dans les domaines de la microélectronique et des nouvelles technologies de l'énergie. Derrière Valéo, PSA et Safran, le CEA demeure ainsi le premier organisme de recherche publique (le CNRS étant 6<sup>e</sup>).

Cette position fait écho au Top 25 Reuters/Clarivate qui distinguait, le 1<sup>er</sup> mars dernier, le CEA comme l'organisme de recherche le plus innovant d'Europe et le deuxième au Monde, derrière le Département de la santé américain. « Le CEA exprime pleinement sa capacité à transformer des connaissances fondamentales en réalisations concrètes, au bénéfice de la société et de son économie », avait alors déclaré l'Administrateur général du CEA, Daniel Verwaerde.

La preuve par les chiffres :



81,2 %

DE TAUX DE PUBLICATION  
DE BREVETS DÉPOSÉS

Événement List Techday

# De la data intelligence à Digitec, futur pôle des technologies numériques de Paris-Saclay

Le 14 mars 2017 restera une date marquante pour le List, institut de CEA Tech. Quelque mille participants industriels et académiques ont en effet assisté à son événement annuel, #techday#cealist, placé cette année sous le signe de la Data intelligence.

Au programme : exposition de 75 démonstrateurs à l'état de l'art du List, mais aussi d'Inria et de Telecom ParisTech, sur les thématiques *smart-data*, cybersécurité, véhicule autonome, industrie 4.0 ; visites réelles et virtuelles de plateformes de robotique, réalité virtuelle, contrôle non destructif ou technologies pour la radiothérapie et l'imagerie (Doséo); un Startup#Village avec onze stands présentant des produits issus des technologies du List...

Moment phare de la journée, la signature du partenariat officialisant la création de Digitec, futur pôle des technologies numériques de Paris-Saclay. Son ambition est de se doter d'une capacité d'innovation sur des thématiques répondant à des enjeux industriels tels que la cybersécurité, l'intelligence artificielle, les systèmes cyberphysiques ou les nouvelles technologies du *manufacturing*. L'infrastructure doublera la capacité du site de Nano-Innov pour atteindre près de 60000 m<sup>2</sup>. Cette dynamique sera soutenue par l'accueil de nouveaux partenaires de recherche, au premier rang desquels Inria qui y installera son siège et le déploiement de plateaux projets industriels, à l'instar de l'implantation en 2016 d'équipes Renault en charge du développement du « véhicule autonome » ou de la prochaine installation de la plateforme *Factory Lab* de l'Alliance industrie du futur.



#techday#cealist

11 1000

START-UP COMMERCIALISANT  
DES PRODUITS ISSUES DE  
TECHNOLOGIES DU LIST

4

ACCORDS SIGNÉS : DIGITEC, LIST ET  
INRIA, LIST ET TELECOM PARISTECH,  
LIST ET STRATE ECOLE DE DESIGN

1500 m<sup>2</sup>

D'EXPOSITION

75

DÉMONSTRATEURS

## Digitec

Le projet Digitec vise à consolider un pôle majeur d'activités de recherche scientifique et technologique dans le domaine du numérique, autour des acteurs actuels de Nano-INNOV, dans un lieu qui localisera notamment le Pôle Systematic Paris-Région, l'IRT SystemX, le CEA-List, Télécom ParisTech et Télécom SudParis.

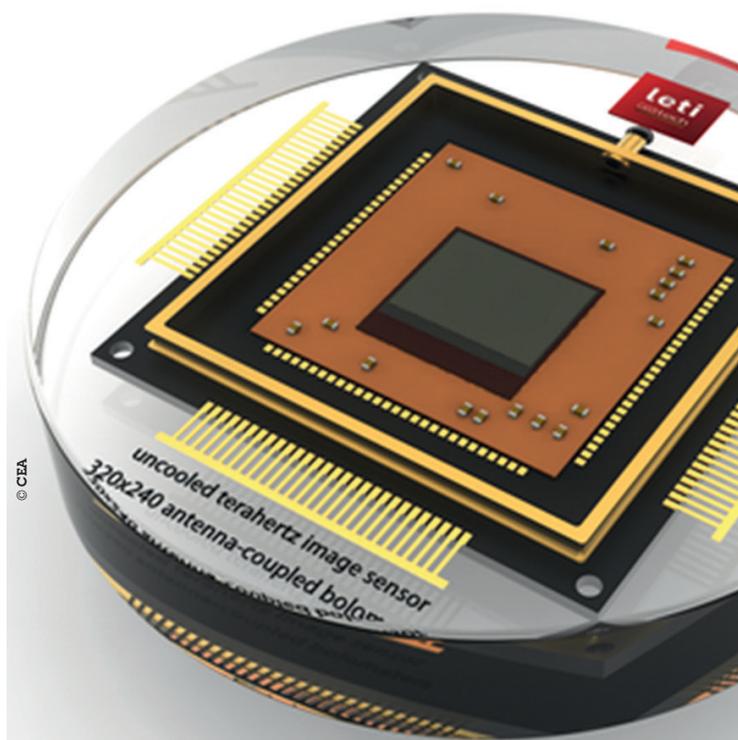


## Imagerie

## Voir à travers la matière

Une caméra térahertz (THz) à l'état de l'art mondial, voici ce qu'a conçu le **Leti** en collaboration avec CEA Tech en Nouvelle Aquitaine et la société S2I. Plusieurs domaines applicatifs pourraient être impactés...

par Aude Ganier



**En fonction de la partie  
du rayonnement qui  
interagit avec l'échantillon,  
il est possible d'en déduire  
la nature des organes.**

Sébastien Becker, responsable  
de laboratoire au Leti

**T**rès peu énergétique, le rayonnement **térahertz** (THz) interagit peu avec la matière ; c'est-à-dire que ses photons peuvent traverser certains matériaux comme le papier, le carton, certains plastiques... Il est également non-ionisant et, par conséquent, moins dangereux pour les êtres vivants que les rayons X. Enfin, les systèmes d'imagerie THz proposent une meilleure résolution spatiale que les scanners à base de micro-ondes ou d'ondes millimétriques utilisés notamment pour les contrôles aéroportuaires. Autant d'avantages qui n'ont pas échappé à une équipe du Leti.

En s'appuyant sur les développements technologiques pour l'imagerie infrarouge thermique à base de microbolomètres, ils ont mis au point un **imageur** THz de 320 x 240 pixels au pas de 50 microns. « *Ce type de capteur ne pouvant pas fonctionner à l'air libre, nous avons travaillé sur le packaging de nos composants, dans un boîtier sous vide statique et transparent au rayonnement THz* » indique Sébastien Becker, responsable de laboratoire au Leti. Le design de l'optique THz et la réalisation de l'électronique de commande de l'imageur ont été pris en charge par I2S qui doit commercialiser cette nouvelle caméra, dans le cadre d'une collaboration avec CEA Tech en Nouvelle Aquitaine.

#### Une innovation pour plusieurs applications

Plusieurs domaines applicatifs sont en effet visés, à commencer par le contrôle industriel non destructif à distance. La caméra THz servirait également les applications de tri postal car elle peut visualiser en temps réel avec une fréquence de 20 Hz le contenu d'une enveloppe ou d'un carton. Le domaine de l'agriculture pourrait aussi utiliser le rayonnement THz, très sensible à l'eau, pour le contrôle hydrométrique des plantes. Enfin, le secteur médical est investigué car ce type d'imageur pourrait être efficace dans la détection de certains cancers de la peau : « *certaines éléments biochimiques ont une signature spectrale dans la gamme des THz ; et en fonction de la partie du rayonnement qui interagit avec l'échantillon, il est possible d'en déduire la nature des organes ou tissus qui le composent...* » explique l'ingénieur. ♦

#### Térahertz

Fréquence de la lumière dont la longueur d'onde est située entre l'infrarouge et les micro-ondes.

#### Imageur

Dispositif qui, associé à une source de rayonnements, capte les ondes lumineuses envoyées puis réfléchies par l'objet d'intérêt ; l'analyse de ce signal est alors convertie en image.

#### Pas

Terme relatif à la taille d'un pixel.

Immunologie

# Sus au Chikungunya !

Une équipe de l'institut François Jacob du CEA démontre l'efficacité préclinique de trois candidats vaccins contre le Chikungunya.

par Amélie Lorec

Notes :

1. Integration of Chikungunya REsearch.
2. MVA (virus Ankara modifié non pathogène).

**E**n 2005, une importante épidémie de Chikungunya touche les îles de l'Océan Indien, avec plusieurs centaines de milliers de cas déclarés ; deux ans plus tard, la maladie apparaît en Europe ; en 2014, elle touche les Caraïbes et s'installe en Amérique... Le virus chikungunya (CHIKV), transmis à l'homme par le moustique tigre, provoque des fièvres et douleurs articulaires aiguës très invalidantes. Et les traitements existants aujourd'hui étant uniquement symptomatiques, il est nécessaire de développer un vaccin efficace pour s'en prémunir !

Plusieurs candidats vaccins ont été développés, dans le cadre du projet européen ICRES<sup>1</sup>, dont trois viennent d'être testés par une équipe de l'institut François Jacob du CEA. Après

avoir démontré leur efficacité sur des modèles murins, ils ont été éprouvés sur des modèles précliniques de primates non humains. « *Nous avons travaillé sur un vaccin conçu à partir d'une souche atténuée de CHIKV ( $\Delta 5nsP3$ ), et sur deux constructions de virus non répliquatif (ADN, MVA<sup>2</sup>) de nos partenaires suédois et espagnols* » explique Pierre Roques, chercheur sur la diffusion virale à l'Institut François Jacob.

## Trois vaccins efficaces

En induisant la production d'une réponse cellulaire antivirale et une forte réponse anticorps qui neutralise la réplication du virus sauvage au sein de l'organisme, les trois vaccins se sont avérés efficaces pour protéger d'une exposition aux génotypes des virus africain et asiatique. « *Aucun signe clinique typiquement associé au Chikungunya n'est apparu (ni inflammation, ni fièvre) quatre et dix mois après la vaccination avec le  $\Delta 5nsP3$ . De même aucun effet secondaire n'a été constaté au cours du suivi, ce qui témoigne de l'innocuité des produits* » indique le chercheur.

Plus facile à produire et à administrer, le vaccin au meilleur potentiel est celui qui repose sur le virus atténué. Les scientifiques vont désormais tenter d'optimiser son protocole d'utilisation, en diminuant les doses injectées pour trouver le meilleur équilibre dose/efficacité, et ainsi assurer davantage son innocuité. Ces travaux apportent donc une base solide pour le développement clinique d'un vaccin CHIKV efficace à long terme. ♦



## Efficacité énergétique

## Adieu chauffages et climatiseurs ?

Avec son « jardin intérieur » pour refroidir le logement en journée, la maison expérimentale bois/béton du Liten est originale, certes, mais surtout très efficace !

par Amélie Lorec



La maison expérimentale et sa version 3D situant le patio (zone rose).

**M**ise en service l'été dernier sur le centre CEA de Cadarache, la maison expérimentale bois/béton du Liten livre ses premiers résultats ! Et ils sont plutôt prometteurs. « Cette maison, nous l'avons conçue et développée avec Trecobat en associant la masse thermique apportée par le béton à une enveloppe bois légère pour exploiter au maximum les ressources de l'environnement et assurer le confort thermique d'une habitation en été dans le sud de la France » rappelle Etienne Wurtz, directeur de recherche au Liten.

#### Une circulation naturelle d'air frais grâce au patio

Plusieurs dispositifs innovants ont été proposés par des partenaires industriels<sup>1</sup>. « Nous avons testé un système de refroidissement par air naturel pour contenir la montée en température dans la maison en journée et éviter le recours à la climatisation. » Principe : une baie coulissante

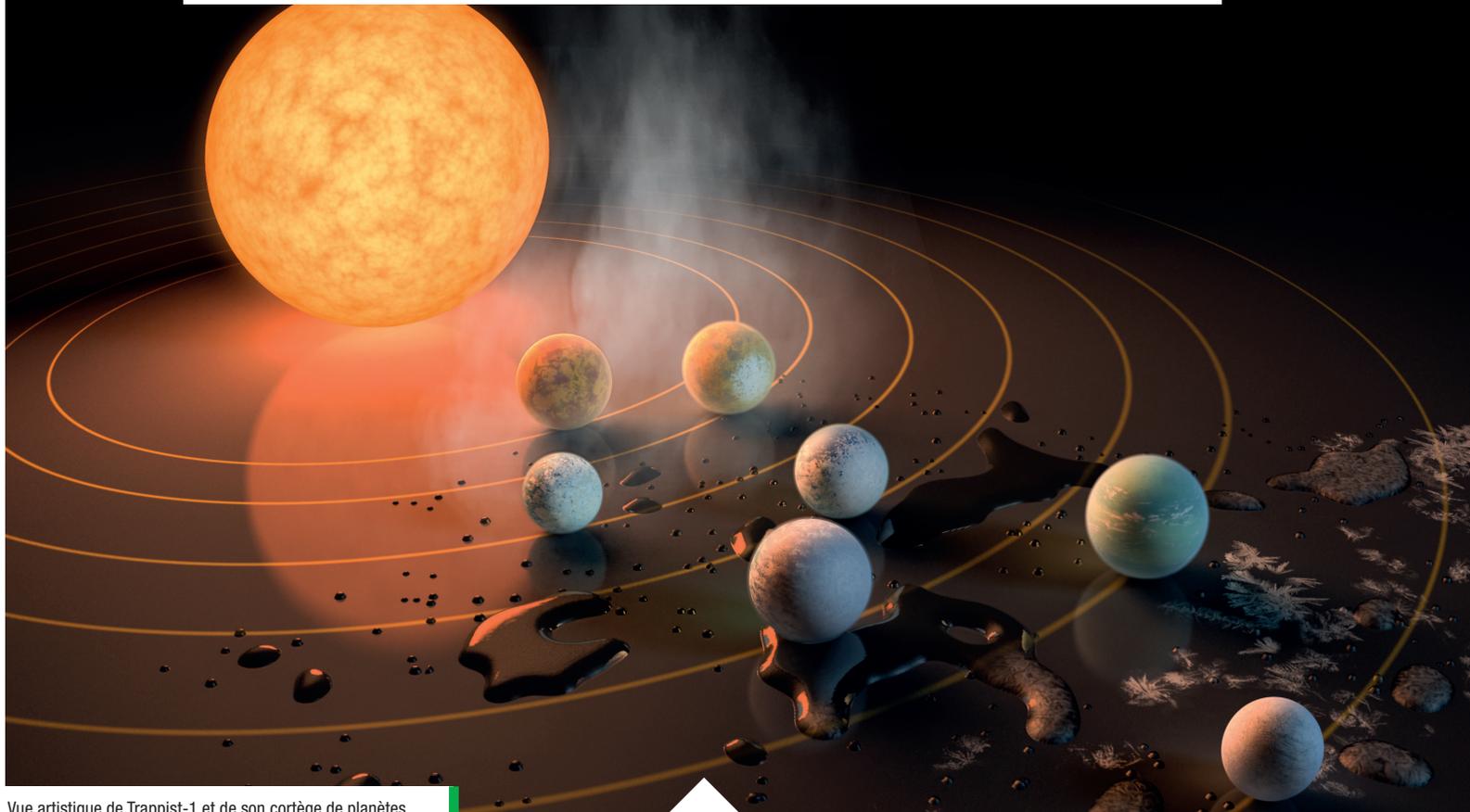
#### Notes :

1. Atlantic, Velux, K-Line, Delta Dore et Vicat

qui s'ouvre automatiquement la nuit sur un patio situé en plein cœur de la maison, comme un jardin intérieur. L'air extérieur circule dans l'ensemble du logement et rafraîchit la structure en béton. Puis il ressort par un Velux situé en toiture, dont l'ouverture et la fermeture sont également contrôlées. « Grâce à des systèmes de pilotage et d'acquisition, qui s'appuient sur de multiples capteurs et algorithmes développés au Liten, nous mesurons des paramètres comme la température, l'humidité et le flux thermique pour rendre compte des performances du dispositif » précise le chercheur. Et les premiers résultats démontrent une très grande efficacité de cette circulation naturelle d'air frais permettant de maintenir une température agréable dans le logement, ne dépassant jamais 25 °C en journée. Autres approches testées : la fermeture automatique des volets en journée pour limiter les apports solaires. Une technique qui s'est avérée pour le moment moins efficace que la circulation de l'air sachant qu'une protection fixe est mise en place pour les apports solaires directs. « Nous travaillons également à l'exploitation de l'air du vide sanitaire, sorte de tampon thermique entre le sol et la dalle du sous-sol où la température est constante. En pompant cet air, on pourrait chauffer la maison en hiver et la refroidir en été » explique Etienne Wurtz. Toutes les informations issues des maisons expérimentales du Liten servent ensuite de référence pour les maisons habitées réalisées dans le cadre du projet Comepos (voir Défis du CEA n° 213) ♦

Une équipe internationale a découvert sept planètes extrasolaires! De tailles équivalentes à celle de la Terre, elles orbitent autour d'une très petite étoile, très peu lumineuse. Un système inédit qui offre des conditions exceptionnelles d'observation, notamment pour progresser sur la grande question de l'habitabilité des mondes.

par Fabrice Demarthon



Vue artistique de Trappist-1 et de son cortège de planètes.

## Les planètes de **Trappist-1**

**N**otre planète Terre est-elle unique en son genre ? Sa formation a-t-elle été un « coup de chance » ou existe-t-il d'autres planètes dans le vaste Univers susceptibles d'abriter la vie ? Pour répondre à ces questions, les astronomes scrutent le ciel sans relâche, à la recherche des planètes dites extrasolaires. Près de 3 600 d'entre elles ont déjà été découvertes et répertoriées. S'ajoute désormais la nouvelle moisson d'une équipe internationale impliquant une chercheuse de l'institut Irfu du CEA : pas moins de sept exoplanètes, d'une taille équivalente à celle de la Terre et gravitant autour de l'étoile Trappist-1, ont été repérées à un peu moins de quarante années-lumière dans la constellation du Verseau. Et trois d'entre elles orbitent même dans une région, appelée « zone d'habitabilité », qui pourrait être propice à l'existence d'eau liquide à leur surface, l'une des conditions *sine qua non* de la formation de la vie telle que connue sur Terre.

### Démasquées en transit

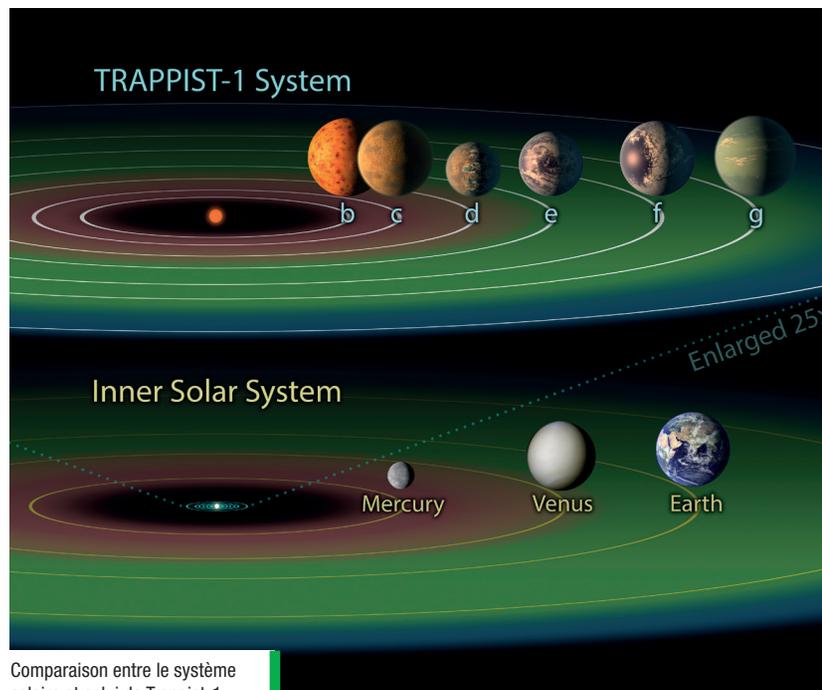
C'est l'année dernière que trois premières planètes ont été détectées en orbite autour de Trappist-1, étoile qui a la particularité intéressante d'être très légère (seulement 8 % de la masse du soleil) et à peine plus grande que Jupiter ! « Jusqu'à maintenant, la plupart des planètes extrasolaires ont été découvertes autour d'étoiles similaires à la nôtre. Or leur détection est plus facile autour d'étoiles de faible masse, moins lumineuses », explique Emeline Bolmont, de l'Irfu. En effet, ces planètes ont été repérées lors de leur passage devant leur étoile, ce que les astronomes appellent un transit (voir encadré p.10). « C'est le principe de l'éclipse, décrit la spécialiste. Lorsque l'orbite d'une exoplanète la fait passer entre son étoile et nous, nous observons des baisses périodiques de la luminosité de l'étoile. Et moins l'étoile est lumineuse, plus le signal est visible. » Ainsi, les mesures haute précision de photométrie de Trappist-1 ont révélé, début 2016, la présence ♦♦♦

des planètes Trappist-1b, « 1c » et « 1d ». Encouragés par cette découverte, les astronomes ont poursuivi les observations avec pas moins de six télescopes au sol et un télescope spatial. « *Nous avons finalement accumulé près de 1500 heures d'observation, soit presque 2 mois en continu, ce qui est assez rare pour être souligné* », insiste Emeline Bolmont. Et l'investissement a payé : non seulement les observations ont confirmé l'existence des trois planètes, mais elles ont aussi révélé celle de 1 e, 1 f et 1 g, et sans doute d'une septième planète, 1 h.

### De premières ressemblances avec la Terre...

L'analyse des données orbitales permet d'en savoir plus sur les membres du système Trappist-1. « *Cinq planètes (b, c, e, f et g) ont des tailles proches de celle de la Terre, tandis que les deux autres (d et h) ont des tailles intermédiaires entre Mars (dont le rayon est environ moitié moindre que celui de la Terre) et la Terre*, écrivent les chercheurs dans leur article paru dans la revue *Nature*. *L'estimation des masses des six planètes internes suggère également qu'elles sont composées de roches.* »

Quant à leur insolation (radiations en provenance de l'étoile influant sur les températures moyennes des planètes), elle apparaît équivalente à celle à l'œuvre dans notre système solaire. En effet, tous ces astres gravitent à une distance très proche de leur étoile, ce qui compense sa faible luminosité. Les six planètes internes tournent autour de Trappist-1 avec des périodes allant de 1,5 à 12 jours (contre 365 jours pour la Terre autour du Soleil). Ainsi, la planète la plus interne (1b) subit une insolation légèrement supérieure à celle de Mercure (planète la plus proche de notre Soleil), tandis que les plus éloignées (1 g et 1 h) ont une insolation un peu plus faible que celle de Mars. « *Au moins trois de ces planètes, 1 e, 1 f et 1 g, gravitent dans la zone dite habitable de Trappist-1*, ajoute Emeline Bolmont. *Il s'agit d'une*

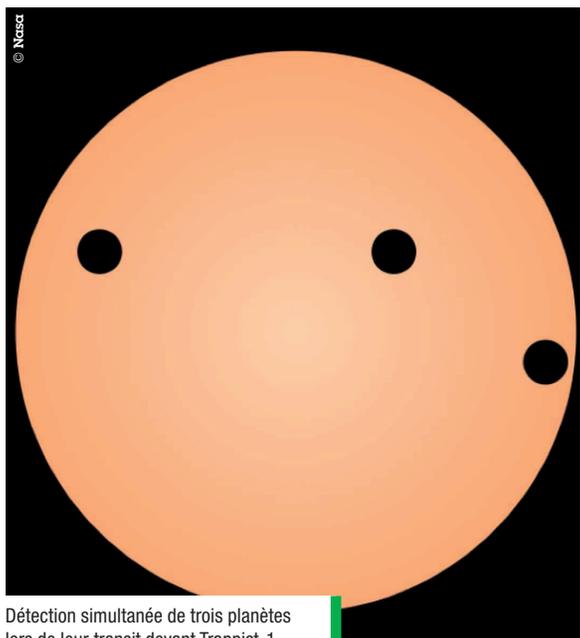


Comparaison entre le système solaire et celui de Trappist-1.

*région autour d'une étoile donnée dans laquelle l'eau peut exister à l'état liquide ; à ses extrémités soit l'eau se vaporise, soit elle se trouve sous forme de glace. »*

### ...mais des conditions différentes...

Pour autant, ces trois planètes sont-elles en tout point identique à notre planète ? Rien n'est moins sûr car la présence d'eau n'est pas avérée ; l'estimation des masses et des densités n'est en effet pas assez précise pour établir la part des éléments volatils dans la composition des planètes (à part pour la planète 1 f qui semble posséder une faible densité



Détection simultanée de trois planètes lors de leur transit devant Trappist-1.

## À la recherche d'autres mondes

Ce n'est qu'en 1995 que la toute première planète extrasolaire en orbite autour d'une étoile de type solaire, 51 Pegasi, a été découverte. Baptisée 51 Pegasi b, cette planète géante gazeuse a été repérée indirectement par la mesure des variations de vitesse radiale de son étoile dans la direction des observateurs. Depuis, plusieurs milliers d'autres exoplanètes ont été détectées, par de multiples techniques : mesure des vitesses radiales, transit, comme dans le cas de Trappist-1, astrométrie, etc. Qu'ont appris les astronomes en observant toutes ces planètes ? Que le système solaire, qui a pourtant servi de référence pendant des années, est loin d'être une norme. Il existe un éventail impressionnant de systèmes planétaires qui abritent toutes sortes de planètes : des telluriques comme la Terre, des « Super-Terres », dont la masse peut atteindre 10 fois celle de notre planète, des mini-Neptunes, des géantes gazeuses comme Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, des « Jupiter chauds », etc. Autant de configurations qui semblent former un continuum et qui font de notre système solaire un simple ensemble parmi tant d'autres.



**Unité astronomique (UA)**

Unité de mesure de la distance en astronomie, qui correspond à la distance entre la Terre et le Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.

**Effets de marée**

Conséquence de la force d'attraction gravitationnelle entre des astres qui influent la vitesse de rotation et la révolution des planètes.

et serait donc riche en éléments volatils). Ensuite, « le système de Trappist-1 est très compact, indique Stéphane Mathis, de l'Irfu. Les distances s'y mesurent en centièmes d'unité astronomique alors que dans le système solaire, Pluton, par exemple, orbite à environ 40 unités astronomiques de notre étoile. »

De fait, une telle proximité entre les planètes et Trappist-1 produit des effets de marées gravitationnelles très importants entre les planètes elles-mêmes et avec leur étoile. Premier effet et non des moindres : la synchronisation entre leur rotation et leur révolution autour de l'étoile ; synchronisation menant par exemple la Lune à présenter toujours la même face à la Terre. Dans ces conditions, les planètes du système Trappist-1 présentent elles aussi la même face à leur étoile, compromettant dès lors l'existence d'un cycle circadien, du moins d'une alternance jour/nuit... Les marées ont une autre conséquence : l'échauffement interne des planètes qui peut être à l'origine d'un volcanisme permettant de dissiper l'énergie emmagasinée. C'est par exemple le cas sur le satellite Io de Jupiter qui, tirillé par les puissantes forces de marée générées par la géante gazeuse à proximité, est le corps le plus volcanique du système solaire ! « Pour les planètes internes du système de Trappist-1, la chaleur à dissiper devrait être importante, donc on pourrait s'attendre aussi à une activité volcanique », estime Stéphane Mathis. D'ailleurs, la ressemblance entre Trappist-1 et ses planètes d'une part, et Jupiter et ses satellites d'autre part, est telle que des mécanismes de formation équivalents ont peut-être été à l'œuvre dans les deux cas.

Des planètes synchrones éventuellement dotées d'un très fort volcanisme... Sans compter un environnement magnétique forcément différent de celui de notre planète, eu égard à la proximité de l'étoile et de sa très faible masse. La Terre, elle, possède un puissant champ magnétique, produit par la rotation de son noyau métallique. Il lui permet notamment de dévier le très fort vent de particules en provenance du Soleil, le vent solaire. Un vent qui accélère à mesure qu'on s'éloigne de l'astre. « Pour le moment, nous ne savons pas si les planètes Trappist-1 possèdent un champ magnétique. Mais, nous pouvons déjà dire qu'elles orbitent sous un vent stellaire lent mais dense et dans un fort champ magnétique comparé aux planètes du système solaire », explique Antoine Strugarek, du Laboratoire dynamique des étoiles et de leur environnement du CEA. Avec quelles conséquences pour la surface ? « Difficile à dire pour le moment, répond le chercheur. Le champ magnétique planétaire est une arme à double tranchant. C'est un cocon qui protège dans l'ensemble contre le vent de l'étoile, mais les lignes de champ magnétique ouvertes peuvent capter les particules énergétiques et les rediriger directement vers la surface de la planète. »

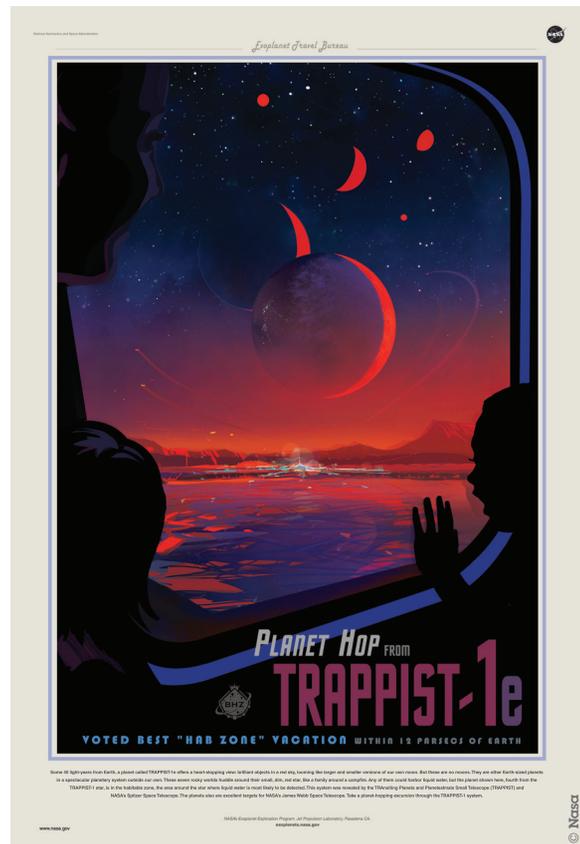
**...et une inconnue quant à leur atmosphère**

Enfin, il reste une question de taille à résoudre : les exoplanètes Trappist-1 possèdent-elles une atmosphère ? « Pour le savoir, il faut réaliser des observations photométriques et

**Au moins trois planètes gravitent dans la zone dite habitable, qui est une région dans laquelle l'eau peut être à l'état liquide ; aux extrémités de cette zone, soit l'eau se vaporise soit elle se trouve sous forme de glace.**

Emeline Bolmont, chercheuse à l'Irfu

spectroscopiques extrêmement précises lors d'un transit », indique Emeline Bolmont. Si atmosphère il y a, la lumière en provenance de l'étoile devant laquelle passera la planète en portera la trace. Il sera alors possible d'en déterminer la composition. « Ces mesures seront possibles avec le James Webb Telescope (JWST) », précise Emeline Bolmont. Véritable bijou de technologie auquel participe le CEA, le JWST est un télescope spatial infrarouge, doté d'un miroir de 6,5 mètres de diamètre. Par comparaison, celui de Hubble, dans le visible, mesure 2,4 mètres et celui de Spitzer, le télescope infrarouge qui a permis de détecter le système Trappist-1, seulement 85 centimètres. Le gain de performance phénoménal devrait alors permettre de détecter les composants des éventuelles atmosphères des exoplanètes et d'y chercher l'eau, le dioxyde de carbone et pourquoi pas l'ozone, un marqueur de la vie. Rendez-vous au lancement du JWST, en octobre 2018. ♦



© P.Stoppa / CEA



Modélisation, en soutien à la conception, du réacteur Astrid.

Énergie nucléaire

# Incontournables simulations

P.14  
Enjeux  
multiples  
et multiples  
échelles

P.16  
Simulations  
de A à Z

Dans le domaine de l'énergie nucléaire civile, la simulation consiste à modéliser de manière prédictive le fonctionnement des réacteurs et des usines du cycle du combustible. Si cette mission s'énonce de manière simple, elle représente en réalité de grands défis.

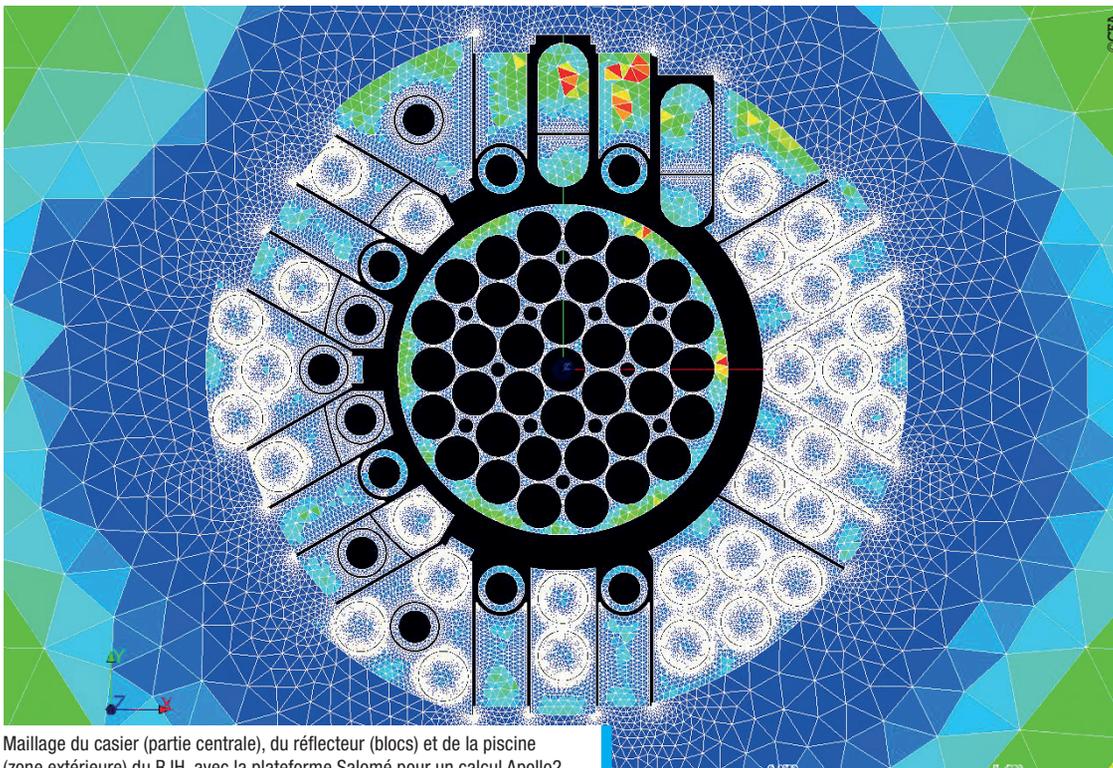
D'une part, elle met en œuvre des synergies entre de nombreuses disciplines, allant de la neutronique à la mécanique des structures, en passant par la chimie et les mathématiques appliquées.

D'autre part, elle se confronte à des phénomènes physiques et chimiques extrêmement complexes, sur des échelles vertigineuses : de la nanoseconde aux milliers d'années, de l'ångström à la dizaine de mètres...

*par Patrick Philippon*

# Enjeux multiples et multiples échelles

La simulation pour l'énergie nucléaire convoque un cortège de compétences et de dynamiques très interactives, portant la science au plus haut niveau, pour modéliser de manière prédictive les réacteurs et les usines du cycle du combustible.



Maillage du casier (partie centrale), du réflecteur (blocs) et de la piscine (zone extérieure) du RJH, avec la plateforme Salomé pour un calcul Apollo2.

ultimes); de l'ångström (atome) à la dizaine de mètres (usine, réacteur); de l'énergie quasi nulle aux millions d'électronvolts (eV); des éléments en concentration « trace » aux solutions concentrées dans les procédés de recyclage. Ensuite, comme le rappelle le responsable scientifique du segment Plateformes et outils de simulation, Anne Nicolas: « nos objets d'intérêt sont soumis à des conditions très spécifiques de température, de pression, de pH et, évidemment, d'irradiation ». La physique des réacteurs implique également l'association de nombreuses disciplines: neutronique, thermohydraulique, thermomécanique, science des matériaux « sous sollicitations », chimie (voir article suivant); auxquelles s'ajoutent nécessairement les sciences du numérique (mathématiques appliquées et informatique) pour analyser les équations, développer des algorithmes et réaliser des codes de calcul, ces derniers étant propres à chacune des disciplines.

## De la singularité à la transversalité

Le couplage entre ces disciplines est l'autre grand défi. En effet, la description du fonctionnement d'une installation nécessite de tenir compte de multiples phénomènes d'interférences entre les disciplines. « Il ne suffit pas de se servir des résultats d'une discipline pour "alimenter" le calcul dans l'autre. Il existe en effet des phénomènes de rétroaction – par exemple entre la neutronique et la mécanique des fluides dans un cœur de réacteur – qui obligent à les simuler ensemble... » explique le spécialiste. Sur ce terrain, les ingénieurs progressent avec le développement de deux outils transversaux: une plateforme logicielle, Salomé<sup>3</sup>, destinée à rendre interopérables les différents codes, en particulier au niveau des entrées/sorties et de la visualisation des résultats; et Uranie, un logiciel d'estimation des incertitudes et d'optimisation pour les études. « Mis à libre disposition de la communauté, y compris au-delà des acteurs du nucléaire, ces deux outils ont déjà été téléchargés des milliers de fois » précise Patrick Blanc-Tranchant.

### Notes:

1. Réacteur Jules Horowitz, un réacteur de recherche en cours de construction à Cadarache.
2. Démonstrateur technologique de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de 4<sup>e</sup> génération.
3. Co-développé avec EDF.

**P**ourquoi recourir à la simulation? À l'évidence, parce qu'il faut pouvoir calculer rapidement avec des moyens adaptés, sans tout expérimenter, aussi bien en ingénierie qu'en R&D. D'autant plus que tout n'est pas accessible à l'expérience. Sans compter que les enjeux en matière d'énergie nucléaire sont multiples: concevoir et construire de nouveaux équipements ou réacteurs (tels RJH<sup>1</sup> et Astrid<sup>2</sup>); analyser les situations accidentelles hypothétiques; prédire des comportements; estimer les incertitudes dans le cadre de phénomènes physiques ou chimiques

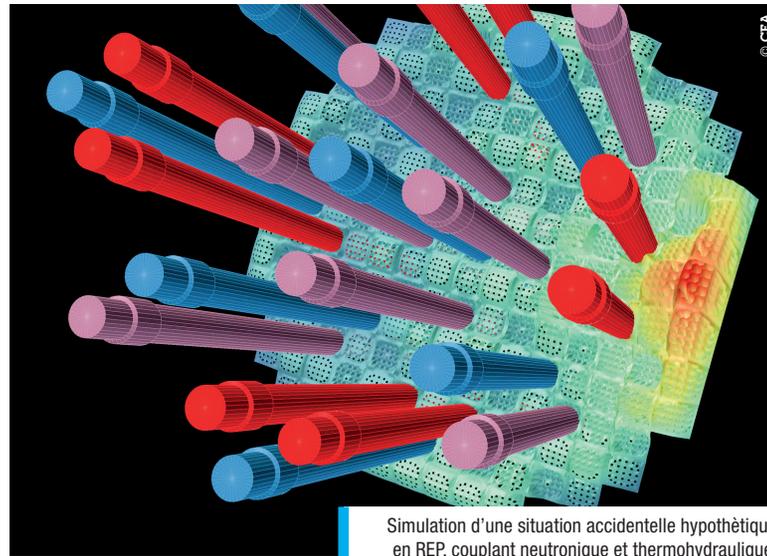
très complexes. « Tout cela, dans un contexte d'exigences réglementaires toujours plus élevées, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) demandant une analyse toujours plus approfondie de scénarios de moins en moins probables et des évaluations progressivement plus fines des marges et des incertitudes » ajoute Patrick Blanc-Tranchant, responsable du programme Simulation à la Direction de l'énergie nucléaire (DEN).

Parmi les défis rencontrés, celui de l'extrême variété des échelles caractérisant les objets d'intérêt: de la nanoseconde (interaction neutron/noyau) au million d'années (décroissance des déchets

Par ailleurs, la qualité du résultat final impose une cohérence dans la finesse de traitement des phénomènes de chaque discipline. Pour cela, les modèles doivent se rapprocher toujours plus des échelles les plus fines. Les progrès des ordinateurs y concourent, comme les futures machines exaflopiques<sup>4</sup>. Mais ces dernières, qui constituent une formidable opportunité, représentent une marche à gravir pour la simulation : « Leur architecture radicalement différente de celle des ordinateurs actuels nécessitera en effet d'adapter très profondément les codes de calcul, ce à quoi nous travaillons depuis plusieurs années, notamment en termes d'ingénierie mathématique et informatique » indique Anne Nicolas.

#### Finesse des simulations et enjeux de la validation

À la DEN, le maître mot est « versatilité ». Cela signifie qu'un même logiciel doit pouvoir être utilisé, à la fois pour effectuer des calculs de référence et des calculs dits industriels. Les premiers sont très précis, au plus près de la physique, et valides dans un très large domaine ; ils durent parfois plusieurs semaines sur de puissants ordinateurs. Les calculs industriels donnent quant à eux des résultats extrêmement fiables mais valables dans un domaine



Simulation d'une situation accidentelle hypothétique en REP, couplant neutronique et thermohydraulique.

de qualification précis et réduit, assortis de marges d'incertitudes bien quantifiées : ils permettent par exemple à un ingénieur d'exploitation d'obtenir un résultat en quelques heures sur un simple PC de bureau. Pour garantir les calculs, le recours à l'expérience demeure le « juge de paix », passage obligé pour valider les codes de simulation. L'importance des moyens requis en matière d'énergie nucléaire – réacteurs de recherche, boucles expérimentales et autres laboratoires chauds – incite toutefois à n'y recourir qu'à bon escient. La DEN s'oriente ainsi vers des expériences

de plus en plus ciblées, pour éclairer très finement des points particuliers. « Pour une validation "intégrale" des calculs, il est par ailleurs possible de s'appuyer sur le retour d'expérience de nos propres installations, voire des réacteurs du parc d'EDF, pour les aspects fonctionnement normal et vieillissement des systèmes » complète Anne Nicolas. ♦

Note :

4. L'exaflop correspond à une capacité de  $10^{18}$  (un milliard de milliards) opérations par seconde.

#### Section efficace

Probabilité d'interaction d'un noyau avec un neutron dans une situation donnée.

## Le processus de simulation

Tout commence par la modélisation, qui consiste à représenter les phénomènes par des équations mathématiques. Ces modèles comportent des données physiques ou chimiques de base (**section efficace** d'un noyau atomique, propriétés thermodynamiques, constantes cinétiques de réactions) issues de mesures expérimentales.

Les ordinateurs ne calculant pas comme les hommes le feraient, des algorithmes de résolution numérique et des architectures logicielles sont développés pour traiter ces équations. Il est alors possible de les résoudre en faisant varier les paramètres relatifs aux situations à explorer (par exemple la température).

Tout ceci est combiné dans des « codes de calcul » qui permettent de décrire les objets à calculer et d'obtenir les valeurs recherchées.

Ce processus est complété par des phases de validation et accorde une place très importante à l'« assurance qualité ».



Supercalculateurs du CEA Bruyères-le-Châtel utilisés par la DEN pour la simulation haute performance.

# Simulations de A à Z

Installation aussi imposante que complexe, siège de phénomènes prenant leur source dans une physique à énergie élevée, le réacteur nucléaire est un des objets « par excellence » de la DEN. « Nous devons simuler des réacteurs nucléaires de technologies très variées. Il est donc indispensable de disposer de codes de calcul capables de modéliser cet ensemble » expose Anne Nicolas qui précise que les usines du cycle du combustible constituent le second objet d'intérêt de la DEN. Le fonctionnement, les performances et la sûreté de toutes ces installations soulèvent des problématiques qui intéressent de nombreux domaines d'expertise : neutronique, mécanique des fluides, comportement des matériaux et composants soumis à des conditions extrêmes de températures et rayonnements, sans compter toute la chimie associée ; autant de disciplines que le CEA aborde de façon complémentaire.

## Neutronique : comportement des neutrons et interactions avec la matière

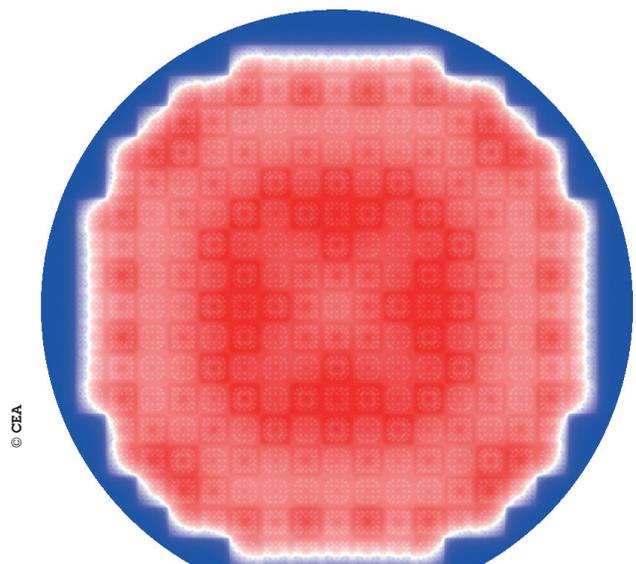
La neutronique, le CEA y travaille depuis sa création et ses premiers codes de simulation dans ce domaine ont vu le jour dès les années 1960. Basés sur la résolution d'une équation parfaitement connue, et sans cesse améliorés, ils ont atteint une grande maturité.

Deux sortes d'outils complémentaires coexistent, utilisant des méthodes de résolution très différentes. « Depuis plusieurs décennies, le code Apollo, qui s'appuie sur des méthodes de résolution, permet le compromis entre précision et coût de calcul, nécessaire pour les calculs industriels. Il est au cœur des chaînes de calcul du CEA, comme d'EDF ou d'Areva » souligne Patrick Blanc-Tranchant, ajoutant que la DEN prépare actuellement la troisième génération de ce code Apollo. Quant au code Tripoli, dédié à la simulation du comportement des neutrons par **méthode Monte Carlo**, grâce à des ordinateurs massivement

parallèles, il peut fournir des calculs de référence « qui s'approchent au plus près de la réalité physique » indique Anne Nicolas. Tripoli est employé à la fois pour calculer les réacteurs et pour faire des études de dimensionnement des **protections biologiques**. Reste à affiner toujours plus les données physiques alimentant les calculs (appelées « sections efficaces »), à la fois par des mesures de plus en plus précises et en utilisant des modèles de physique nucléaire de plus en plus fins<sup>1</sup>. Enfin, le processus est complété en validant expérimentalement les résultats sur des maquettes critiques<sup>2</sup> qui sont des réacteurs de recherche de faible puissance.

## Valider les simulations : du code aux maquettes critiques

Le CEA dispose à Cadarache de plusieurs petits réacteurs de recherche. Eole, démarré en 1965, est destiné à la validation expérimentale des outils et schémas de calcul (appelés formulaires) pour des applications du parc de réacteurs à eau légère ; y sont reproduites des sous-parties de cœur de réacteur. Minerve vise l'amélioration des données nucléaires grâce à une technique unique au monde d'oscillation d'échantillons de matière ; il



Visualisation de la puissance dégagée dans un grand cœur de REP obtenue avec Apollo 3 ; et cœur du réacteur de recherche Eole à Cadarache.

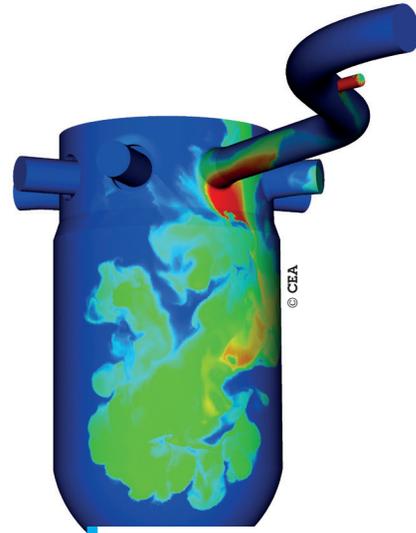
permet de reproduire une grande diversité de spectres neutroniques (des cellules de dissolution du combustible à La Hague aux REP du parc français). Masurca, fonctionnant depuis 1966 et actuellement en phase de rénovation, est utilisé pour qualifier des schémas de calcul des réacteurs à neutrons rapides, dits RNR<sup>5</sup>. « Les réacteurs Eole et Minerve ont par exemple permis de valider expérimentalement toute la physique du recyclage du combustible Mox dans les REP » illustre Patrick Blaise, responsable de laboratoire au Département d'études des réacteurs, et responsable du segment « réacteurs expérimentaux ».

« Pour être pertinente et anticiper l'accroissement des performances de nos outils de calcul, l'expérimentation doit avoir des marges d'incertitudes inférieures à celles des simulations. Nous avons donc besoin de machines plus flexibles, d'instrumentation plus sensible et de techniques expérimentales de plus en plus fines » poursuit le spécialiste. C'est pourquoi la DEN envisage un projet de renouvellement de ces machines, baptisé Zephyr, en ayant pour cible de répondre aux besoins futurs, par exemple qualifier les données nucléaires dans des spectres

encore plus variés qu'actuellement (en y incluant ceux des RNR), et appréhender les phénomènes de « transitoires de cinétique spatiale » qui représentent un gros challenge pour les codes dans les décennies à venir.

**Thermohydraulique : comportement des fluides**

La thermohydraulique met en jeu des problématiques extrêmement complexes (turbulences d'un mélange eau/vapeur au sein du cœur par exemple) ; et cette discipline ne dispose pas de code de référence pour représenter conjointement et dans tout le volume du réacteur, l'ensemble des phénomènes élémentaires. Les chercheurs utilisent donc une gamme d'outils spécifiques à différentes échelles de modélisation. Le calcul le plus précis, à partir des équations de base de la mécanique des fluides<sup>4</sup>, est possible à très petite échelle (découpage de l'ordre du centimètre) avec des méthodes dites de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). L'échelle suivante (dizaine de centimètres) nécessite d'autres méthodes et s'appuie en particulier sur des données expérimentales. Au niveau plus global, le logiciel Cathare, alimenté par les



Simulation par une méthode CFD d'une injection massive d'eau froide dans la cuve d'un réacteur.

résultats de échelles inférieures et les nombreuses expériences dédiées, simule avec une finesse moindre les circuits dans leur ensemble : cuve, générateurs de vapeur, pressuriseur, avec les conduites qui les relient. Il peut décrire, par ailleurs, comment réagit l'ensemble si une tuyauterie se rompt à un endroit. Selon Patrick Blanc-Tranchant, « nous allons de plus en plus connecter ces échelles. L'utilisation de la CFD se développe par exemple très significativement même si nous sommes encore loin de pouvoir modéliser par ce biais l'ensemble des phases de fonctionnement d'un cœur de réacteur. »

De la recherche reste ainsi à faire, pour modéliser plus précisément les phénomènes de turbulence et ceux qui impliquent les mélanges diphasiques (par exemple eau/vapeur).

**Thermomécanique des structures**

Pour la thermomécanique, la DEN a développé le logiciel CAST3M<sup>®</sup> depuis de très nombreuses années. Cet outil simulant la mécanique des déformations en général permet de répondre à des questions comme « cette enceinte résistera-t-elle à ce type de séisme ? » ou « comment se déforme la gaine du crayon de combustible ? ». Très utilisé aussi pour la physique du combustible, CAST3M<sup>®</sup> est téléchargeable librement pour les applications de R&D. Il ne concerne ◆◆◆

**Méthode Monte Carlo**

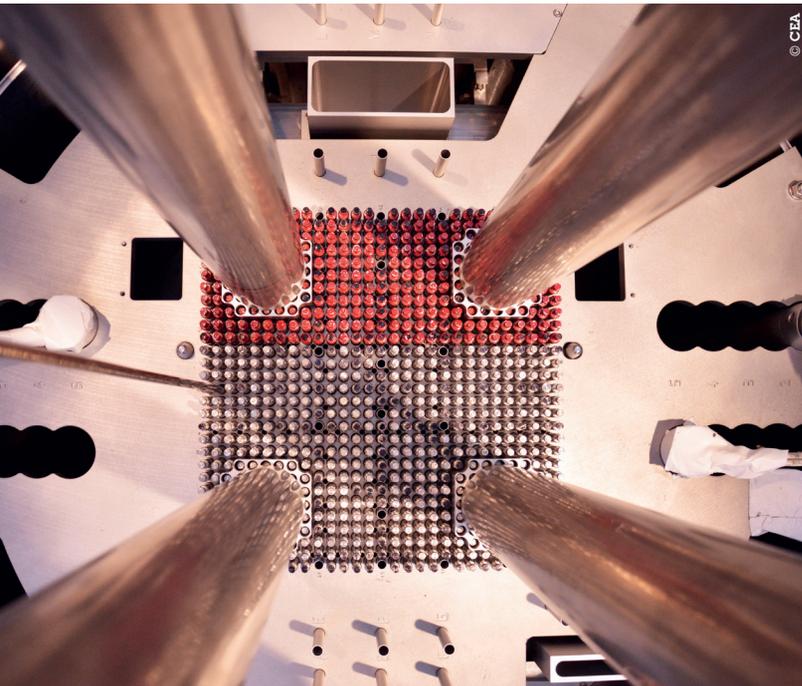
Méthode algorithmique de calcul de valeurs numériques par des techniques probabilistes.

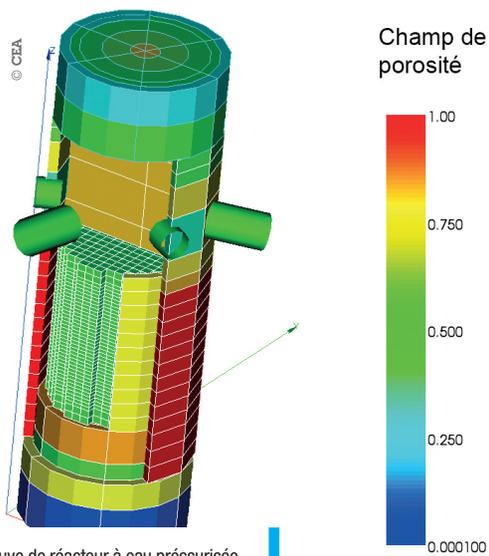
**Protection biologique**

Dispositif (en béton, eau ou plomb) permettant de limiter l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants lors des opérations d'exploitation.

**Notes :**

- 1. En collaboration avec des laboratoires académiques et les autres directions du CEA.
- 2. ou ZPR (*Zero Power Reactor*) chez les anglo-saxons.
- 3. Comme Astrid.
- 4. Les équations de Navier-Stokes.





Maillage 3D d'une cuve de réacteur à eau pressurisée.

toutefois que la thermomécanique mettant en jeu des déformations relativement lentes. Pour décrire des situations à la dynamique très rapide, la DEN et EDF avec JRC et l'Onera co-développent un outil spécifique : Europlexus.

**Matériaux sous sollicitations : phénomènes physico-chimiques, effets d'irradiation et comportement mécanique**

Dans le domaine des matériaux également, la simulation a toujours été très utilisée. À cela plusieurs raisons : l'irradiation crée des défauts dans la matière (les défauts ponctuels « **lacunes et interstitiels** ») difficilement accessibles expérimentalement ; la manipulation d'échantillons irradiés demeure délicate ; l'étude du vieillissement ne saurait se faire en temps réel... « *Sachant que le comportement macroscopique des structures provient in fine de modifications à l'échelle atomique, nous devons utiliser une multitude d'échelles de simulation successives, les résultats "homogénéisés" ou non d'une brique alimentant la brique de taille supérieure* » explique Jean-Luc Béchade, du Département des matériaux pour le nucléaire. À chacune de ces étapes correspondent un modèle physique, un mode de calcul et des

outils de caractérisation. À chaque échelle aussi un phénomène particulier à étudier : formation des défauts, ségrégation d'espèces chimiques, apparition de cavités, durcissement du matériau, etc.

**De l'atome à la dynamique moléculaire**

On passe ainsi des phénomènes physico-chimiques au comportement mécanique des matériaux. Les propriétés de base de la matière dérivent du comportement des électrons, régi par l'équation de Schrödinger. Une physique bien connue, sans paramètres ajustables mais nécessitant des moyens de calcul intensif et ne pouvant prendre en compte actuellement que quelques centaines d'atomes. Puis vient la dynamique moléculaire classique qui permet, au prix de modèles d'interactions entre atomes simplifiés, de simuler plusieurs millions d'atomes. « *C'est là qu'on peut simuler l'arrivée des neutrons et ses effets sur l'organisation à l'échelle atomique du matériau. On "voit" ensuite comment des **dislocations** présentes dans le cristal se déplacent et quelle force cela nécessite pour franchir les obstacles formés par les défauts d'irradiation, ce qui est très*

*difficile à mesurer expérimentalement* » ajoute le chercheur. Et l'on « monte » ainsi, de proche en proche, en passant par un grain monocristallin (quelques microns), puis les assemblages polycristallins (plusieurs centaines de milliers de grains). « *Arrivés à l'échelle du millimètre, on passe à des techniques dites d'éléments finis cristallins : on découpe le domaine spatial en petits éléments sur lesquels, à partir de formulation simplifiée, on réalise les calculs* » poursuit Jean-Luc Béchade. Une technique théoriquement utilisable sans limite d'échelle puisque le nombre de mailles simulables dans un objet donné dépend de la puissance de calcul disponible.

**Le défi de simuler des alliages complexes et des combustibles**

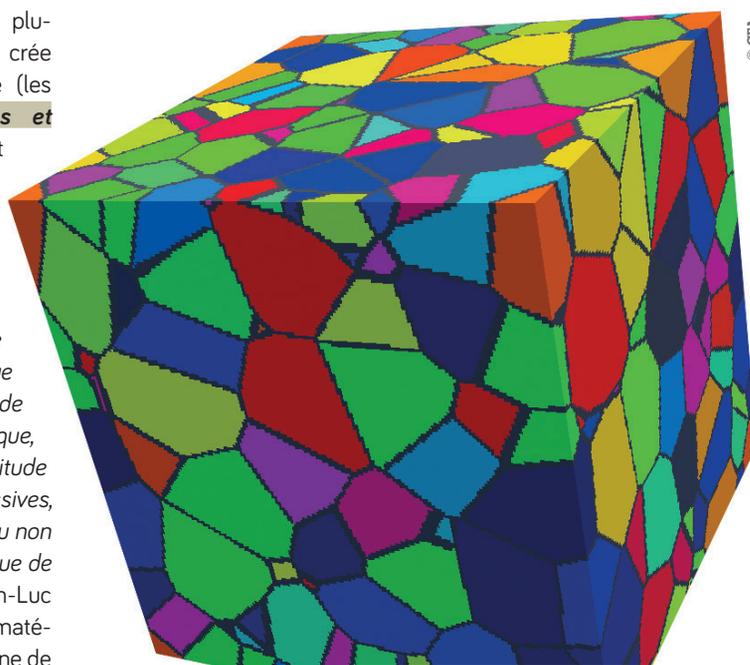
Les problèmes qu'il reste à résoudre ne manquent pas. « *Nous ne pouvons aujourd'hui simuler que des matériaux avec un nombre très réduit de constituants - fer et carbone, fer et nickel, etc. Nous voulons simuler des alliages réels, bien plus complexes, mais lorsqu'on rajoute un élément dans la simulation, il faut décrire son effet sur toutes les équations fondamentales* » expose Jean-Luc Béchade. Autre grand défi : parvenir, pour les combustibles

**Lacunes et interstitiels**

Atomes déplacés par l'arrivée d'une particule qui vont se loger entre les positions atomiques normales du réseau cristallin (interstitiel) en laissant des sites inoccupés (lacunes).

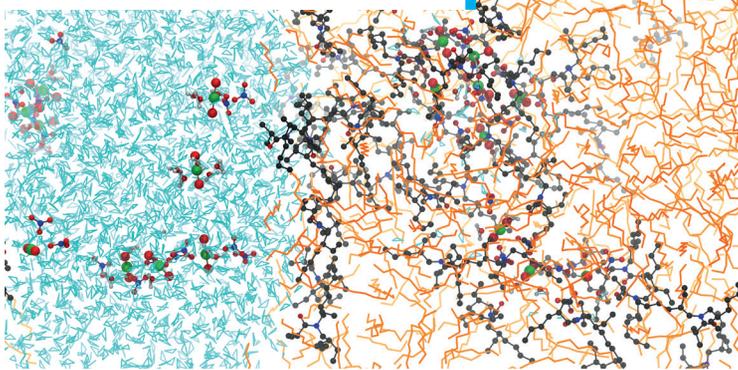
**Dislocation**

Défaut linéaire affectant l'arrangement des atomes dans un solide cristallin.



Maillage d'une microstructure polycristalline pour simuler le comportement mécanique d'un agrégat polycristallin.

Modélisation en dynamique moléculaire d'une interface acide/solvant caractéristique d'un procédé de séparation par extraction liquide/liquide.



actuels qui sont des céramiques d'oxyde mixte d'uranium (U) et de plutonium (Pu), à une simulation du même niveau que celle disponible pour les métaux. Or, le problème est nettement plus complexe, du fait de la structure électronique des matériaux à base d'U et de Pu et de la présence de défauts chargés par exemple. Pour la caractérisation expérimentale, la DEN se dote d'ailleurs d'un microscope électronique à transmission dédié aux combustibles irradiés, ce qui n'a jamais été fait. Il faut aussi développer des modèles prenant mieux en compte la température réelle dans un réacteur, et ne pas rester limité à 0 kelvin, comme cela est d'usage aux échelles les plus fines de la simulation et du calcul de structure électronique *ab initio*.

### Chimie : le tour complet du cycle du combustible

À la DEN, la simulation en chimie intervient pour des aspects aussi variés que la corrosion des installations, le retraitement du combustible et le conditionnement des déchets ultimes. Autant dire qu'il n'existe pas de démarche unique... Christophe Poinssot, chef du Département de recherche sur les procédés pour la mine et le recyclage, détaille à titre d'exemple la simulation du procédé de traitement des combustibles nucléaires usés pratiqué à La Hague. Il s'agit d'en extraire l'uranium et le plutonium grâce à un procédé chimique d'extraction « liquide-liquide » mis en œuvre après avoir préalablement dissous le combustible dans de l'acide nitrique. À l'échelle la plus fine, les outils de

modélisation sont capables de décrire comment un atome, par exemple d'uranium ou de plutonium, s'associe à une molécule extractante potentielle. « Nous ne savons pas encore prédire la performance d'une molécule mais nous pouvons d'ores et déjà repérer celles qui ne marcheront pas : cela évite bien des expériences inutiles » explique-t-il.

À l'échelle du procédé, la DEN a développé l'outil Parex qui modélise l'ensemble des phénomènes physiques et chimiques intervenant dans les procédés de séparation. Il prend en compte les modèles thermodynamiques permettant de prédire les réactions chimiques, les cinétiques des réactions et des échanges aux interfaces, les échanges de chaleur avec l'extérieur ou, de manière simplifiée, les mouvements des fluides. Moyennant quoi, Parex peut répondre à de multiples besoins : concevoir une usine, adapter un procédé à un nouveau combustible, former les opérateurs, analyser la sûreté... « C'est un outil unique au monde qui peut décrire ce qui se passe durant toutes les phases de fonctionnement du procédé, y compris en phase transitoire lors des démarrages/arrêts du procédé, lors d'un changement de débit, etc. » souligne Stéphane Bourg, chef de projet Simulation de l'aval du cycle. Fort de cette expérience, le CEA prépare pour fin 2017 une nouvelle version, Parex +, qui sera à son tour déployée à La Hague.

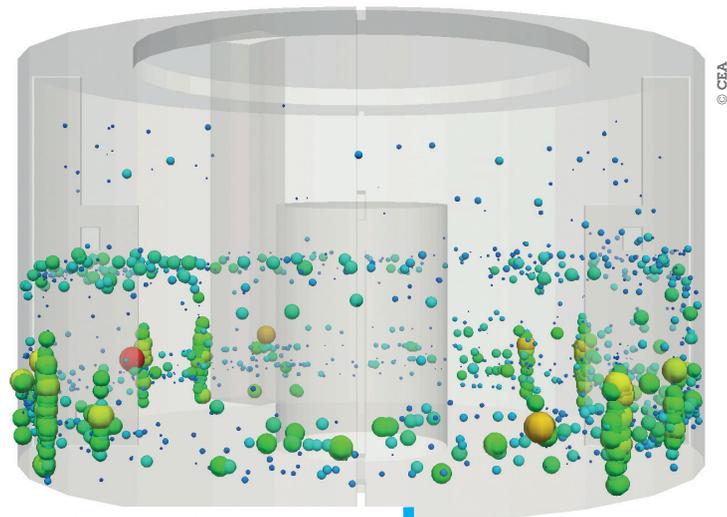
### De la molécule extractante à l'usine de retraitement du combustible

La DEN dispose aussi de codes simulant le cycle nucléaire dans son

ensemble, avec des objectifs aussi variés que déterminer les flux de matière nucléaire ou l'empreinte environnementale de tel ou tel type de cycle, estimer la dosimétrie totale des opérateurs dans une filière donnée ou dresser un calendrier prévisionnel de la production des déchets ultimes à stocker. « Ce n'est pas tant un enjeu de simulation à proprement parler car il n'y a pas d'équation complexe à résoudre. Il s'agit davantage d'un problème d'intégration de grandes quantités de données provenant de multiples sources et d'autres outils de modélisation pour en tirer une information pertinente. En ce sens cela se rapproche des approches "big data" » précise Christophe Poinssot.

En outre, les équipes de la DEN développent aussi des outils de simulation pour modéliser les autres étapes des procédés de recyclage, comme la dissolution du combustible usé et la refabrication de combustible neuf.

La simulation devrait également permettre dans le futur d'envisager un pilotage plus pointu des procédés de recyclage en détectant au plus tôt les éventuels écarts au fonctionnement attendu grâce à la comparaison des résultats des modèles aux mesures réalisées par des capteurs installés au sein du procédé. Toutes ces compétences ont également des applications potentielles dans l'industrie du recyclage et de l'économie circulaire. ♦



Modélisation de la décantation des particules dans une centrifugeuse industrielle du type de celle de Areva/La Hague.

Leti/CEA Tech

Laboratoire des micro et nanotechnologies et leur intégration dans les systèmes

Big/CEA

Institut de recherche et de biotechnologies de Grenoble

List/CEA Tech

Laboratoire des systèmes numériques intelligents

Microélectronique

## Vers une nouvelle génération d'imageurs

En plaçant une photodiode sous l'oxyde enterré d'un transistor FDSOI, des chercheurs du **Leti** obtiennent un transistor hautement sensible à la lumière visible ! Avec une dynamique de sept ordres de grandeur, comparable aux meilleurs imageurs CMOS, il peut fonctionner sans connexion électrique entre diode et transistor, par simple couplage capacitif. De plus, il permet de réaliser des pixels de moins d'un micron carré. Ces performances ont été présentées à la conférence IEDM 2016. À présent, les scientifiques doivent modéliser les effets de ce dispositif unitaire, le produire à l'échelle de matrices, et imaginer ses applications futures. *Minanews*

Biodiversité

## D'où viennent les fleurs ?

« *Labominable mystère* » de l'origine des fleurs, tel que le qualifiait Charles Darwin, est en partie levé par une collaboration européenne<sup>1</sup> impliquant le **Big**. Précédées par les « gymnospermes », dont les conifères, les plantes à fleurs ont un mode de reproduction beaucoup plus complexe. Alors que les premiers ont des cônes mâles et femelles rudimentaires, les fleurs possèdent des organes mâles (étamines) et femelles (pistil) entourés par des pétales et des sépales, et des ovules protégés au sein du pistil. Mais, comment la nature a-t-elle pu inventer une structure si différente ? Les chercheurs ont étudié une plante gymnosperme, la *Welwitschia mirabilis*<sup>2</sup>, et découvert des ovules stériles et du nectar dans ses cônes mâles : preuve d'une tentative échouée de produire une fleur bisexuelle. Ils ont surtout trouvé des gènes similaires à ceux responsables de la formation des fleurs, et organisés selon la même hiérarchie : l'activation d'un gène déclenchant celle du suivant, et ainsi de suite. Or ce mécanisme de gènes en cascade n'a pas pu être inventé au moment de l'origine de la fleur. Il a simplement été hérité par un ancêtre commun... que l'étude de la biodiversité permettra peu à peu d'identifier. *AL*

Notes :

1. CNRS/Inra/CEA/Université Grenoble Alpes/ENS de Lyon / Université Claude Bernard Lyon 1 et les Jardins de Kew (Royaume-Uni).
2. Elle pousse dans les conditions extrêmes des déserts (Namibie et Angola) et peut y vivre plus d'un millénaire.



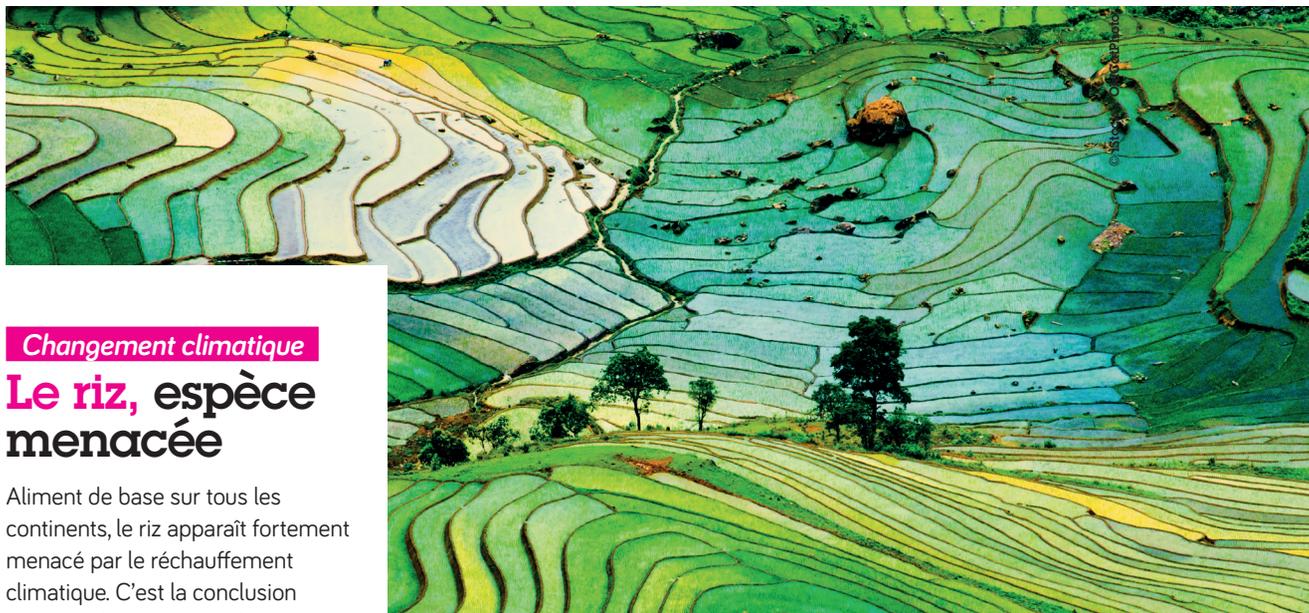
Welwitschia mirabilis.

Médecine du futur

## Examens sans faille des clichés médicaux

Désormais, les oncologues et radiothérapeutes pourront compter sur un outil de pointe pour affiner leur diagnostic et leur protocole de traitement. En combinant les données issues de différents clichés (IRM, scanner, TEP...) par une analyse statistique non supervisée, le logiciel développé au **List** repère automatiquement les contours des organes et des tumeurs. Mieux, il distingue les zones tumorales actives des zones nécrosées ou des œdèmes. Pour cela, il procède à la segmentation 3D des tissus en leur attribuant une signature visuelle caractéristique. Il propose ainsi des schémas d'identification au médecin qui peut les valider ou les corriger si besoin. À la clé : un gain de temps et d'objectivité par rapport à une segmentation manuelle coupe par coupe. Le logiciel permet également une caractérisation quantitative de l'évolution des tumeurs et l'identification de nouveaux marqueurs tumoraux. Il est par exemple utilisé pour la détection précoce d'éventuelles rechutes chez des patients atteints de glioblastomes. *AG*

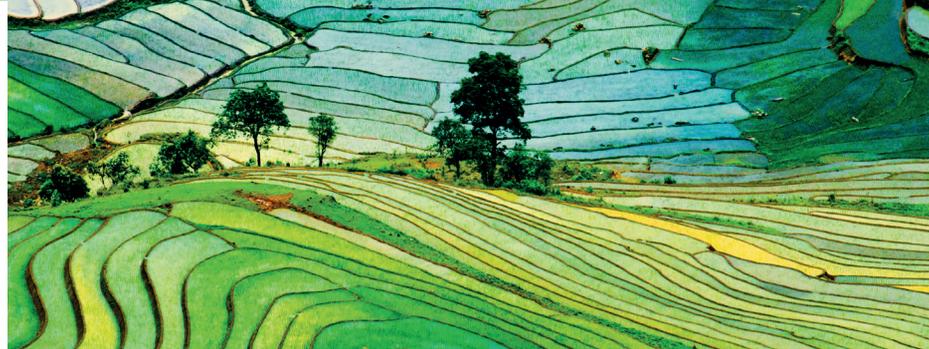




### Changement climatique

## Le riz, espèce menacée

Aliment de base sur tous les continents, le riz apparaît fortement menacé par le réchauffement climatique. C'est la conclusion d'une étude internationale associant le LSCE qui recommande la mise en œuvre de stratégies actives d'adaptation et d'atténuation des impacts (sélection génétique, etc.). En effet, des expériences de culture de riz en parcelles chauffées, sur de courtes périodes, conduisent à des pertes significatives de rendement, de l'ordre de - 5,2 % par degré supplémentaire. Calibrées à partir de ces données expérimentales, des projections en 2100 issues de modèles globaux de prévision des rendements, estiment cette perte à 8,3 %/°C. Cette valeur préoccupante dépasse les hypothèses envisagées par l'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires : de -4,2 %/°C à -6,4 %/°C. AG



### Nanotoxicologie

## Les bonbons ne sont pas si bons...

Le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) est un additif alimentaire (E171) couramment utilisé, notamment en confiserie. D'où la nécessité de s'intéresser aux effets d'une exposition orale à ce produit, ce que font des chercheurs de l'Inra, dans le cadre d'une étude<sup>1</sup> associant le CEA. Leur protocole : administration quotidienne d'une dose de 10 mg d'E171 par kilogramme du poids corporel d'un rongeur (soit l'exposition moyenne de l'homme à cet additif), pendant 100 jours. Pour la première fois, les scientifiques démontrent, *in vivo*, l'absorption du TiO<sub>2</sub> par l'intestin et son passage dans le sang. « *Nous avons aussi observé des effets sur les fonctions immunitaires et sur le développement de lésions prénéoplasiques dans le côlon* » explique Marie Carrière, chercheuse à l'Inac. Enfin, ces travaux révèlent que l'exposition orale chronique au TiO<sub>2</sub> a des effets initiateurs et promoteurs des stades précoces de la cancérogenèse colorectale chez l'animal. De premiers résultats qui justifient une étude de cancérogenèse selon les lignes directrices de l'OCDE<sup>2</sup>. AL

#### Notes :

1. Dans le cadre du projet NANOGUT financé par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).
2. Organisation de coopération et de développement économiques.

#### Lésions prénéoplasiques

Qui apparaissent « avant la nouvelle croissance » et sont marqueurs d'un possible développement cancéreux.

### Microélectronique

## Nanoparticules dispersées en ordre de marche !

La microélectronique accueille une nouvelle classe de matériaux composites en couche mince aux propriétés hors normes, comme celle de voir des matériaux magnétiques fonctionner sans perte jusqu'à 20 GHz (20 fois plus qu'avant). Mise au point par Le Leti et le LTM<sup>1</sup>, ces composites sont basés sur la dispersion, dans une matrice polymère, d'une très forte charge de nanoparticules (plus de 50 % du volume total). Ces dernières sont protégées de l'oxydation par une coquille graphène nanométrique individuelle, et la distance entre elles est contrôlée par une seconde coquille polymère nanométrique afin de maîtriser les propriétés visées. Leur mise en œuvre en salle blanche a été démontrée sur des wafers 200 mm pour des couches jusqu'à 20 microns d'épaisseur. *Minanews*

#### Note :

1. Laboratoire des technologies de la microélectronique (CEA/CNRS/Université Joseph Fourier).

Leti/CEA Tech

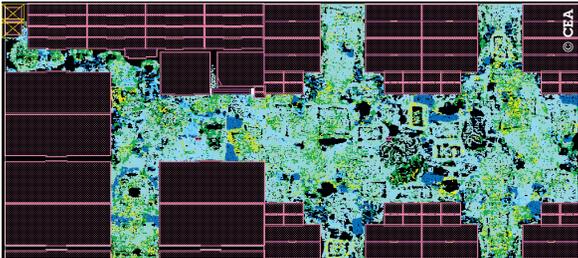
Laboratoire des micro et nanotechnologies  
et leur intégration dans les systèmes

Iramis/CEA

Institut rayonnement et matière de Saclay

## Calcul haute performance

## Clock Mesh règle l'horloge interne des circuits



La puissance de calcul des ordinateurs est également liée à la fréquence de l'horloge interne de leurs circuits. Celle-ci, telle un chef d'orchestre, rythme les échanges entre les composants ; et, plus ces échanges seront rapides, plus l'ordinateur sera puissant. Voici l'objectif de l'architecture « en grille » Clock Mesh, développée au **Leti**. Dans les architectures classiques « en arbre », il subsiste des décalages temporels de réception du signal entre deux composants éloignés ; cela implique de prendre en compte des marges de sécurité qui limitent la possibilité d'augmenter la fréquence de l'horloge. Avec Clock Mesh, la distribution du signal d'horloge dans les circuits est uniformisée et les décalages de réception réduits de 50 % : les fréquences peuvent alors atteindre plus de 2 GHz. Les chercheurs du Leti étudient à présent différentes pistes pour limiter la consommation énergétique de leur technologie Clock Mesh. AL

## Biomimétisme

## Ballet de bactéries

En solution, de grandes populations bactériennes peuvent s'animer spontanément en mouvements collectifs oscillants. Et ce, alors même que les cellules bougent individuellement de façon aléatoire. Grâce à un modèle mathématique, un chercheur de l'**Iramis** démontre qu'il s'agit ici d'une nouvelle famille de **matière « active »**, où une synchronisation « faible » entre cellules voisines permet un ordre à longue portée.

Les oscillations collectives sont omniprésentes dans la nature et jouent un rôle vital dans de nombreux processus comme l'embryogenèse, la croissance des organes ou la synchronisation des réseaux de neurones. Aussi, ces travaux enrichissent-ils la connaissance des processus d'auto-organisation dans les systèmes biologiques qui pourraient être appliqués à l'élaboration de matériaux, de tissus, voire de dispositifs actifs complets. AL

Matière  
« active »

Système dans lequel l'énergie injectée engendre du mouvement (assemblées de cellules, troupeaux d'animaux, matériaux synthétiques résultant de processus d'auto-organisation...).



## MATIÈRE NOIRE

Depuis 13,7 milliards d'années, l'Univers ne cesse d'évoluer. Et, contrairement à l'impression qu'il donne à première vue, il serait composé à 85 % de matière noire et serait également en mouvement permanent.

Une animation vidéo propose de comprendre son implication, étape par étape.  
<http://cea.fr/go/matiere-noire>

Grâce à des outils performants de détection à différents âges de l'Univers, les physiciens réalisent des simulations dans lesquelles ils rejouent l'histoire de l'Univers, depuis ses premiers instants jusqu'à la formation des grandes structures observées aujourd'hui.

Une histoire dans laquelle la matière noire tiendrait un rôle de premier plan.



## Abonnement gratuit

Vous pouvez vous abonner sur :  
<http://cea.fr/defis> ou en faisant parvenir par courrier vos nom, prénom, adresse et profession à **Les Défis du CEA - Abonnements. CEA. Bâtiment Siège. 91191 Gif-sur-Yvette.**

## LA SCIENCE DU VIVANT



Cette synthèse sur l'histoire des sciences du vivant depuis l'Antiquité replace la biologie et les disciplines connexes (écologie, éthologie, etc.) dans leur contexte social et technologique. À travers une vision globale, elle permet d'apprécier la nature des échanges et des idées qui ont façonné cette discipline, et la font encore évoluer aujourd'hui.

*Histoire de la biologie. Michel Morange.*  
Éditions Broché. 10,80 €

## LE POINT SUR LE NUCLÉAIRE



Bien que l'énergie nucléaire produise plus de 10 % de l'électricité mondiale et n'émette pas de gaz à effet de serre, elle est sujette à controverses. Cet ouvrage ambitionne de fournir, sous une forme très accessible, des informations factuelles et objectives sur ses fondements, enjeux et perspectives. Une large place est par ailleurs accordée aux données et notions strictement scientifiques.

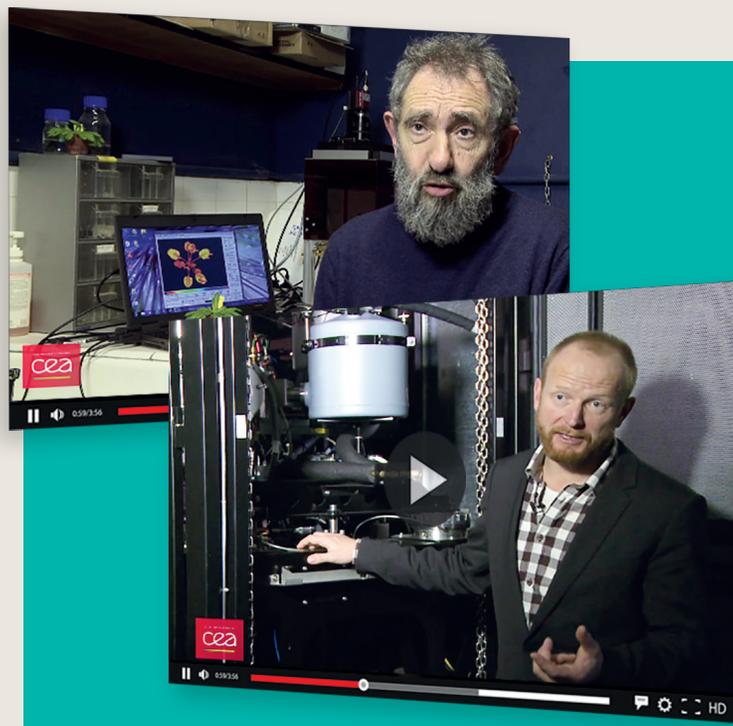
*Pourquoi le nucléaire ? Bertrand Barré*  
Éditions De Boeck Supérieur. 12,90 €

## L'ASYMÉTRIE



L'asymétrie de l'organisme humain, la dissymétrie du cerveau, la structure asymétrique des protéines, la dissymétrie subtile des réactions chimiques... Y aurait-il un lien entre toutes ces formes ? Cet ouvrage passe en revue les diverses tentatives d'explication de l'asymétrie gauche-droite.

*La Science insolite de l'asymétrie, De la « ola » au neutrino. Frédéric Flamant.*  
Éditions Seuil. 21 €



### Vidéos ERC

## Le CEA et les 10 ans de l'ERC : « Aux frontières du savoir »

Qu'ont en commun un biophysicien passionné par le désordre d'un système pourtant si performant qu'est la photosynthèse, et un ingénieur caractérisant en temps réel les atomes d'un dispositif microélectronique ?

En plus d'être visionnaires, tous deux sont lauréats des prestigieuses bourses de l'*European Research Council* (ERC) attribuées à des chercheurs du meilleur niveau mondial dont les projets sont en rupture par rapport à l'état de l'art scientifique.

Venez découvrir leurs recherches dans les premiers épisodes d'une série de portraits vidéo réalisée à l'occasion des 10 ans de l'ERC. L'occasion de savoir pourquoi l'un recherche les propriétés vibrationnelles de la photosynthèse, l'autre parvient à détecter le mouvement des atomes d'oxygène pendant le fonctionnement d'une mémoire d'ordinateur.

<http://cea.fr/go/portraits-erc>



Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019 | Directeur de la publication Xavier Clément | Rédactrice en chef Aude Garnier | Rédactrice en chef adjointe Amélie Lorec | Ont contribué à ce numéro : Fabrice Demarthon, Patrick Philippon et Estelle Lemaître | Comité éditorial Stéphanie Delage, Alexandra Bender, Héliène Burlet, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Françoise Poggi, Camille Giroud et Sophie Kerhoas-Carvata | Iconographie Micheline Baryard | Infographie Fabrice Mathé | Photo de couverture © P. Stroppa/CEA | Diffusion Lucia Le Clech | Conception et réalisation www.grouperouge.vif.fr | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés. Ce magazine est imprimé sur du papier Satimat, issu de forêts gérées durablement. Galaxy Imprimeurs.

#Cviral



80 ans  
Palais



Quel est le point  
commun entre une  
bactérie, un fou-rire,  
une rumeur, l'économie  
et un bâillement ?  
La contagion bien sûr !  
Cela méritait bien une  
exposition, pour les  
petits, et les grands !

FINANÇÉ PAR LE MUSEE

Du microbe au fou rire, tout s'attrape

# VIRAL

**Exposition** > 18.10.16 > 27.08.17

**M** Champs-Élysées Clemenceau **M** Franklin Roosevelt

UNE PRODUCTION

CIÊNCIA VIVA

PAVILHÃO DO  
CONHECIMENTO  
CENTRO CIÊNCIA VIVA

AVEC

universcience

HEUREKA

EN PARTENARIAT AVEC

Direct.Matin

SCIENCE

Telêrama

Society

SPFOI

franceinfo

